сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

Р2-88-173

В.Н.Стрельцов

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЕЛЯТИВИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КООРДИНАТ

1988

1. ВВЕДЕНИЕ

На основе факта существования предельной скорости распространения физических сигналов в свое время возник вопрос о пересмотре определения временной координаты в удаленной пространственной точке. В результате был установлен конвенциональный характер этого понятия. В рамках теории относительности пространственные координаты вводятся на основе локационного опыта и измеряется суммарное время распространения светового сигнала. Суждение о том, что свет проходит туда и обратно одинаковые расстояния, является поэтому условным соглашением. Вообще релятивизация координат, т.е. пересмотр их определения с точки зрения теории относительности, позволил практически выяснить их физический смысл и провести "обобщение" этих основополагающих понятий. В частности, было осознано, что опыту не противоречит анизотропное пространство — время. В этой связи представляет интерес реализация такой возможности даже с помощью "мыслимых моделей".

С другой стороны, уже введение пространства Минковского явилось по сути дела математическим выражением неразрывной связи пространственных и временных координат, их аналогии. В частности, движение вспять во времени, приводящее к существованию античастиц, можно считать прямым следствием такой аналогии. Вместе с тем, встречающиеся еще элементы performed некоковариантного описания, как правило, связаны именно с временными компонентами 4-величин. Некоторые стороны отмеченных вопросов и будут предметом последующего рассмотрения.

2. ОБОБЩЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КООРДИНАТЫ

2.1. Транспортировка часов

Как известно, в теории относительности время в некоторой удаленной от данного наблюдателя А точке (В) определяется на основе локационного опыта. Однако все еще существуют мнения, что эта проблема может быть просто решена перенесением часов с бесконечно малой скоростью из точки A в точку B. Хотя, строго говоря, введение понятия скорости уже предполагает решенной проблему определения времени (одновременности в различных точках пространства).

Мы, однако, хотим коснуться другой стороны этой проблемы. В общем, время в точке B, введенное с помощью движущихся часов, будет так или иначе связано с формулой релятивистского замедления времени. Казалось бы, при достаточно медленном движении, когда $v \ll 1$ $(c = 1)$ и величинами порядка v^2 и меньше можно пренебречь, такие часы действительно можно использовать для установления времени в точке B. Однако в общем случае различие все же останется, и будет составлять (см., например, /1/):

$$t \approx (1 + \delta_0 v) t_0. \tag{1}$$

Здесь δ_0 — временной параметр, $\delta_0 = 2\epsilon_0 - 1$, ϵ_0 — параметр Рейхенбаха. Из формулы (1) вытекает, что для выполнения требуемого условия необходимо отбросить и член $\delta_0 v$. Но тем самым мы пренебрегаем и эффектом, кстати говоря, — чисто релятивистским, который фактически и хотим измерить.

2.2. Переход от обобщенных координат к общепринятым

В общем случае выражение для квадрата интервала имеет вид:

$$ds^2 = g_{00} dt^2 + 2 g_{0\alpha} dt dx^\alpha + g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta, \tag{2}$$

где мы выделили временную координату; $\alpha, \beta = 1,2,3$.

Для перехода к традиционному выражению

$$ds^2 = dt_T^2 - d\ell^2 \tag{3}$$

преобразуем (3) к виду (см., например, /2/)

$$ds^2 = \left(\sqrt{g_{00}}\, dt + \frac{g_{0\alpha} dx^\alpha}{\sqrt{g_{00}}}\right)^2 - \left(-g_{\alpha\beta} + \frac{g_{0\alpha} g_{0\beta}}{g_{00}}\right) dx^\alpha dx^\beta. \tag{4}$$

Таким образом, для времени имеем

$$dt_T = \sqrt{g_{00}}\, dt + \frac{g_{0\alpha} dx^\alpha}{\sqrt{g_{00}}}, \tag{5}$$

а для квадрата расстояния

$$d\ell^2 = \kappa_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta, \tag{6}$$

где

$$\kappa_{\alpha\beta} = -g_{\alpha\beta} + \frac{g_{0\alpha} g_{0\beta}}{g_{00}}. \tag{7}$$

В дальнейшем для простоты мы ограничимся плоским (1+1) пространством Минковского. В этом случае для компонент матричного тензора имеем

$$g_{00} = 1, \quad g_{01} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1}\right), \quad g_{11} = -\frac{1}{c_1 c_2}. \tag{8}$$

где c_1 — скорость света в положительном направлении оси X ("вправо"); c_2 — скорость света в противоположном направлении ("влево").

Отправляясь от изотропного интервала $ds^2 = 0$ для традиционной скорости света с учетом (8), найдем

$$c = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) dx}{dt - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2}\right) dx}. \tag{9}$$

На основании последнего выражения можно заключить, что, напротив, переход от общепринятых координат к обобщенным* связан с заменой

$$t \to t - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2}\right) x, \quad x \to \frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) x. \tag{10а,б}$$

С другой стороны, квадрат интервала может быть вместо (4) преобразован к виду

$$ds^2 = \left(g_{00} - \frac{g_{01}^2}{g_{11}}\right) dt^2 - \left(\sqrt{|g_{11}|}\, dx + \frac{g_{01}}{\sqrt{|g_{11}|}} dt\right)^2, \tag{11}$$

откуда для скорости света вместо (9) теперь будем иметь

* *Введение допустимой временнóй анизотропии.*

$$c = \frac{dx + \frac{1}{2}(c_2 - c_1)dx}{(\sqrt{\frac{c_2}{c_1}} + \sqrt{\frac{c_1}{c_2}})dt} . \tag{12}$$

Таким образом, введение допустимой пространственной анизотропии, как следует из (12), связано с заменой

$$x \to x + \frac{1}{2}(c_2 - c_1)t , \quad t \to (\sqrt{\frac{c_2}{c_1}} + \sqrt{\frac{c_1}{c_2}})\, t . \tag{13а,б}$$

Можно сказать, что формулы (10) и (13) описывают два допустимых опытом симметричных преобразования координат (временная и пространственная "калибровки").

2.3. Возможные модели, реализующие пространственно-временную анизотропию

2.3.1. Как известно, в мысленных опытах, на которые опирается теория относительности, предполагается, что наблюдатель или локатор, посылающие сигналы, являются точечными объектами. Однако по современным представлениям даже объекты микромира имеют конечные размеры. Поэтому будем мыслить такого "наблюдателя", например, протоном. Допустим далее и такую возможность, что один из u-кварков протона посылает "локационный" сигнал (скажем, в виде фотона), сигнал отражается в некоторой удаленной точке и возвращается назад. При этом он может поглотиться тем же u-кварком, который за это время уже сместится в другую точку, или другим u-кварком*. С точки зрения стороннего наблюдателя в данном опыте сигнал идет туда и обратно разное время, или, точнее, — проходит разные расстояния.

2.3.2. Несохранение пространственной четности позволяет в принципе реализовать временную анизотропию. Теперь есть возможность сконструировать "правосторонние" и "левосторонние" часы /3/. Можно, скажем, сделать часы с кобальтом-60, магнитами и детекторами, регистрирующие β-распадные электроны и считающие их. Пусть при этом (для определенности) магнитное поле направлено вдоль оси X, а сам источник находится в начале координат. Всякий раз, когда регистрируется электрон, секундная стрелка слегка подвигается. Тогда расположенный справа детектор будет реализовать "правые" часы, а зеркально расположенный — "левые". Но поскольку в зеркально отраженные часы приходит больше электронов, то, очевидно, что они будут идти быстрее.

* *В силу их тождественности мы не можем отличить эти две возможности.*

Таким образом, расположенные слева часы не будут согласовываться с правосторонними, что и является практическим примером временной анизотропии. Конкретно рассмотренная возможность соответствует случаю $c_1 > c_2$.

2.3.3. В определенной связи со сказанным мы хотим обратить внимание на указываемую теорией относительности определенную зависимость пространственной и временной инверсий.

Рассмотрим для этого (псевдо)скалярную волновую функцию $\psi'(t', x')$, описывающую, например, покоящийся объект. Произведем (для частного случая $t' = 0$) инверсию пространственной координаты:

$$\psi'(0, z') \to \mp \psi'(0, -z'). \tag{14}$$

С точки зрения другой инерциальной системы отсчета S, движущейся относительно исходной точки S′, на основании преобразований Лоренца эта процедура будет выглядеть так:

$$\psi(t, z) \to \mp \psi(-t, -z). \tag{15}$$

Пусть по данным S′-наблюдателя в результате некоторого взаимодействия (процесса) появилась примесь состояний, пространственная четность (P) которых отличается от исходной. Иначе говоря, взаимодействие идет с нарушением P-четности. Однако с точки зрения S-наблюдателя появление примесного состояния может быть связано как с нарушением пространственной, так и временной четности (T) или совместного действия этих факторов. В общем случае ($t' \neq 0$) пространственная инверсия сама по себе с точки зрения S-наблюдателя не является ковариантной операцией.

Больше того, вспомним представление t и x через операциональные координаты t_- и t_+ (см., например,/4/):

$$t = \frac{1}{2}(t_+ + t_-), \quad z = \frac{1}{2}(t_+ - t_-). \tag{16}$$

На основании (16) очевидно, что изменение знака z означает переход к $-t_+$ и $-t_-$, а это, в свою очередь, означает изменение направления времени (инверсию временной координаты t), т.е., по сути дела, 2-инверсию. В общем случае, например, в рамках декартовой модели, это будет 4-инверсия.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ ВВЕДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА МИНКОВСКОГО

3.1. Изотропия пространства Минковского (ПМ)

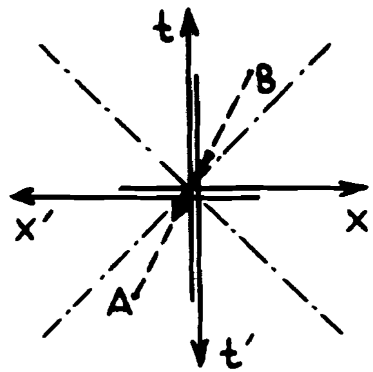
Это условие означает отсутствие выделенного направления в пространстве и допускает, в частности, любые повороты координатных осей. На представленном ниже рисунке такую возможность реализует, например, система координат (t', x'), повернутая относительно исходной (t, x) на 180°. С другой стороны, к (t', x')-карте можно перейти с помощью 2-инверсии* . Важно подчеркнуть, что введение ПМ привело фактически к геометризации времени. Образно говоря, время приобрело как бы свойства пространственной координаты. В результате была математически закреплена общность свойств пространственных и временных координат. Может быть, наиболее важным следствием этого явилось осознание возможности существования в ПМ векторов, имеющих отрицательные временные компоненты.

Конечно, сам факт, что каждому элементарному процессу соответствует обратный (инверсный) процесс, был известен давно. Вообще Т-инвариантность всегда рассматривалась как общее свойство движений, управляемых любыми силами природы.

Однако специфическим результатом теории относительности является то, что в ее рамках энергия p^0 определяется как

$$p^0 = m\frac{dx^0}{d\tau}, \tag{17}$$

где m — масса, $x^0 = t$, τ — собственное время. Поэтому при $t = -|t|$ мы будем иметь движение объекта с отрицательной энергией $p^0 = -E$ вспять во времени, что является частным случаем движения в противоположном 4-направлении частицы с 4-импульсом $p^i = -|p^i|$ (см., например, /5,6/).



Чтобы понять физический смысл последнего результата, обратимся к рисунку. На нем представлена пространственно-временная картина движения частицы с энергией E из точки $A(-\Delta t, -\Delta x)$ в точку $B(\Delta t, \Delta x)$, стрелкой показано направление ее спина s_{BA} (спиральность $\lambda = -1/2$). Пусть q^- — ее заряд. С точки зрения

* *В общем случае это будет 4-инверсия.*

(t', x')-карты из точки $A(\Delta t', \Delta x')$ в точку $B(-\Delta t', -\Delta x')$ переместилась частица с энергией — E. Таким образом, в точке A энергия увеличилась на величину E, появился спин s_{AB}(и заряд q^+), в точке B энергия уменьшилась, появился спин s_{BA} (и заряд q^-). Но такая картина движения вспять во времени частицы с отрицательной энергией совершенно не согласуется с нашим повседневным (макроскопическим) опытом, основанным на существовании "стрелы времени". Поэтому, переходя на привычный язык, мы истолкуем это явление следующим образом.

Из точки $B(-\Delta x')$ в момент времени $-\Delta t'$ вышла частица с энергией E и зарядом q^+, в момент времени $\Delta t'$ она прибыла в точку $A(\Delta x')$; ее спиральность $\lambda = 1/2$. Но это как раз то, что мы обычно называем античастицей. Отсюда с очевидностью следует, что другие ее характеристики (масса, время жизни, величина магнитного момента и пр.) должны с необходимостью совпадать. Этот переход по существу представляет Т-инверсию и автоматически, как видно, приводит к пространственному отражению (P) и зарядовому сопряжению (C). Поскольку фактически Т-операция приводит нас к античастицам, а их отличие от античастиц определяется тем или иным зарядом, то наблюдаемое миллислабое нарушение Т-инвариантности, как кажется, должно приводить к невозможности "введения" античастиц. А это, в свою очередь, может означать миллислабое нарушение закона сохранения лептонов.

Таким образом, уже в основополагающей работе Минковского /7/*, т.е. задолго до известной статьи Дирака /8/ , фактически содержится предсказание существования античастиц. Больше того, например, при выводе специальных преобразований Лоренца методом к-коэффициента (к — доплеровский множитель) второй, отрицательный знак обычно отбрасывается (условие ортохронности). Однако именно эта возможность, в частности, (при $v \to 0$) сводится к упомянутой 2-инверсии.

Отметим также, что в рамках рассмотренного подхода, очевидно, нет необходимости в искусственном введении моря заполненных состояний с отрицательной энергией.

3.2. Релятивистский дипольный момент

Теория относительности установила, что материальные тела представляют собою физически не пространственные объекты, а пространственно-временные конфигурации. При этом геометризация времени фактически позволяет обращаться с координатой как с привычной, скажем, декартовой координатой.

* *Может быть, точнее, – в статье Пуанкаре /7а/.*

Рассмотрим с этой точки зрения элемент площади $d\sigma^{ik}$ в трехмерном пространстве Минковского. Привычная нам чисто пространственная компонента этой величины $d\sigma^{12} = \frac{1}{2}(xdy - ydx)$ теперь является всего лишь одной из трех компонент. Две другие $d\sigma^{02}$ и $d\sigma^{10}$ определяют фактически временные компоненты тех двух векторов, которые и составляют площадь $d\sigma^{12}$. Для нас здесь существенно то, что при рассмотрении быстрых движений величина $d\sigma^{12}$ будет зависеть от того, в какие моменты времени "берутся" положения указанных пространственных отрезков. Это особенно существенно потому, что такая важная физическая характеристика, как магнитный дипольный момент, определяется именно произведением тока J на площадь (контура) (см., например,/9/):

$$\mu^{\alpha\beta} = \frac{1}{2} J \oint_L d\sigma^{\alpha\beta} . \tag{18}$$

При этом отмеченная особенность будет фактически характеризовать силу взаимодействия частицы (обладающей магнитным моментом) с магнитным полем. Но, может быть, самое важное здесь то, что временные компоненты $\mu^{0\beta}$ будут определять релятивистский дипольный момент. Нетрудно видеть, что в нерелятивистском пределе выражение для элементарного дипольного момента действительно переходит в классическое

$$\Delta d^1 = \frac{1}{2} J \Delta\sigma^{01} = \frac{1}{2}\frac{\Delta q}{\Delta t}(-x^1 \Delta t) = -\frac{1}{2}\Delta q x^1 . \tag{19}$$

Конечно, применительно к элементарным частицам мы должны опираться на соответствующие операторы/10/. Однако физическая суть затронутой проблемы останется неизменной.

Экспериментальный факт отсутствия собственного электрического дипольного момента ($\mu^{0\beta'} = 0$) у элементарных частиц, обладающих магнитным моментом ($\mu^{\alpha\beta} \neq 0$), фактически означает, что элемент площади "берется" одновременно (синхронно) именно в собственной системе частицы (S'). Иными словами, например, взаимодействие нуклона происходит так, что составляющие его кварки действуют одновременно в S'. Установленный в настоящее время верхний предел для собственного электрического дипольного момента/11/ позволяет заключить, что допустимая неодновременность не превышает 10^{-11} с. Поэтому можно сказать, что лоренцево сокращение может единственно проявиться только при скоростях движения порядка 10^{-11} см/с, а величина его составит 10^{-9}%. При заметных же скоростях движения мы всегда будем иметь удлинение продольных размеров в соответствии с концепцией релятивистской длины/12/.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы показали, что вопреки еще встречающемуся мнению транспортировка часов не дает возможности установить время в удаленной пространственной точке. Были рассмотрены две альтернативные возможности перехода от обобщенных пространственно-временных координат к традиционным. Предложены две возможные модели реализации допустимой опытом анизотропного пространства-времени. Одна из них учитывает неточечность "наблюдателя", другая основывается на несохранении четности. Как одно из главных следствий введения пространства Минковского, было рассмотрено движение вспять во времени, что в конечном счете связано с существованием античастиц. Наконец, было подчеркнуто, что отсутствие у элементарных частиц, обладающих магнитным моментом, собственного электрического дипольного момента при учете конечности их пространственных размеров может рассматриваться как косвенное, но опирающееся на исключительно точные опыты, указание в пользу релятивистской "формулы удлинения".

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стрельцов В.Н. Сообщение ОИЯИ, Р2-87-643, Дубна, 1987.*
2. *Логунов А.А. Лекции по теории относительности и гравитации. Современный анализ проблемы. М.: Наука, 1987, с.50.*
3. *Фейнмановские лекции по физике. Вып. 4., М.: "Мир", 1965, с.255.*
4. *Стрельцов В.Н. Сообщение ОИЯИ, Р2-82-330, Дубна, 1982.*
5. *Реками Э. В кн.: Астрофизика, кванты и теория относительности. М.: "Мир", 1982, с.53.*
6. *Стрельцов В.Н. Сообщение ОИЯИ, Р2-84-843, Дубна, 1984.*
7. *Минковский Г. В сб.: Принцип относительности, М., Атомиздат, 1973, с.167.*

7a. *Логунов А.А. К работам Анри Пуанкаре "О динамике электрона", М., Изд-во МГУ, 1984, с.84.*

8. *Dirac P.A.M. Proc. Roy.Soc., 1931, v.133A, p.60.*
9. *Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976, с.262.*
10. *Стрельцов В.Н. Сообщение ОИЯИ, Р2-82-404, Дубна, 1982.*
11. *Алтарев И.С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, т.44, с.360.*
12. *Стрельцов В.Н. Сообщения ОИЯИ, Р2-87-817, Р2-87-877, Дубна, 1987.*

Рукопись поступила в издательский отдел
16 марта 1988 года.